



Aalborg Universitet

AALBORG UNIVERSITY  
DENMARK

## Renere teknologi på energiområdet

Østergaard, Poul Alberg

*Published in:*  
Humanøkologi : miljø, teknologi og samfund

*Publication date:*  
2002

*Document Version*  
Også kaldet Forlagets PDF

[Link to publication from Aalborg University](#)

*Citation for published version (APA):*  
Østergaard, P. A. (2002). Renere teknologi på energiområdet. I Arler, Finn (red.) (red.), *Humanøkologi : miljø, teknologi og samfund* (s. 263-282). Aalborg Universitetsforlag.

### General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

### Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at [vbn@aub.aau.dk](mailto:vbn@aub.aau.dk) providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

## Renere teknologi på energi-området

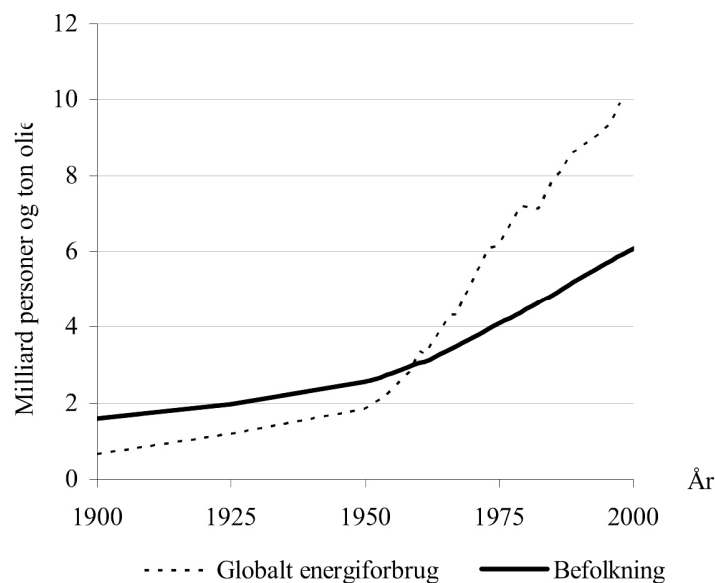
Poul Alberg Østergaard

### *Indledning*

Energiforbruget er et af menneskeheden største ressourceforbrug. Det er et voksende forbrug, et miljømæssigt belastende forbrug, og i vid udstrækning et forbrug af begrænsede ressourcer. Samtidig er energiforbrug af en vis størrelse en forudsætning for menneskeheden opretholdelse og ikke mindst civilisationens beståen. Siden 1950 er det globale energiforbrug øget femfold, og ændres udviklingen ikke, kan det skabe uoverstigelige problemer. Velstående lande vil måske være i stand til at afbøde miljø- og ressourcemæssige problemer, men fattige lande kan risikere problemer af samfundsnedbrydende dimensioner. Med miljøbelastninger og ressourcepres, der støt og roligt øges qua en voksende verdensbefolkning og en øgende aktivitet (se Figur 1), er der således al mulig grund til at begrænse energianvendelsen. (Se f.eks. Brown et al. (1999), Meyer et al. (1994) og Brundtlandkommissionen (1987)).

I dette kapitel behandles muligheder og begrundelser for at reducere energianvendelsen. Der er to overordnede dele hhv. a) en kortlægning af energisituationen med energiforbrugets størrelse, fordeling på energikilder og de problemer, der er forbundet med energiforbruget samt b) en beskrivelse af de ændringsmuligheder, der foreligger. Disse ændringsmuligheder følger de overordnede blokke, der opereres med i renere teknologitankegangen i.e. hhv. substitution, teknologioptimering og renere produkter på forbrugersiden.

I kapitlet tages et forholdsvist teknisk afsæt med gennemgang af de tekniske forhold i energisystemet og herunder specielt de ikke ubetydelige tabsfaktorer, der har en væsentlig indflydelse på energiforbrugets størrelse. Derimod behandles energisystemets organisatoriske eller økonomiske forhold ikke, og det ligger således uden for afgrænsningen at behandle de forskellige incitamentsstrukturer (tilskud, afgifter, andre former for adfærdsregulering, normer m.v.), der kan fremme renere teknologi på energiområdet.



**Figur 1.** Udvikling i globalt energiforbrug og befolkningstal. Før 1950 er der kun anvendt data for 1900 og 1925. Kilde: Brown et al. (1999), US Census Bureau, BP-Amoco (2000) og UN Statistical Yearbook 1986.

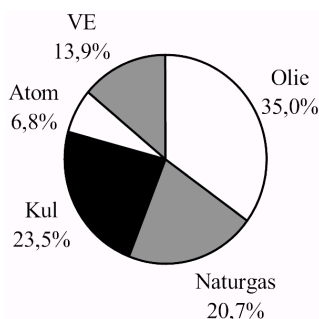
### **Energisituationen i verden**

Energisituationen i verden kan beskrives med udgangspunkt i Figur 2, dvs. en række energikilder, der transformeres til den ønskede form - f.eks. kul til el - og endeligt forbruges. Dette er den traditionelle energifaglige opdeling af energisystemet. Indtænkes renere teknologitankegangen i figuren, ses, at kilder kan substitueres, transformationen kan optimeres, og forbrugsprodukter forbedres.



**Figur 2.** Energisystemets opdeling i tre dele.

I dette afsnit fokuseres på energiresourceanvendelsen fordelt på forskellige energikilder, udviklingen i det samlede energiforbrug samt de problemer det støt voksende energiforbrug giver anledning til.



**Figur 3.** Fordeling af det globale energiforbrug på energikilder 1999. Kilde: IEA.

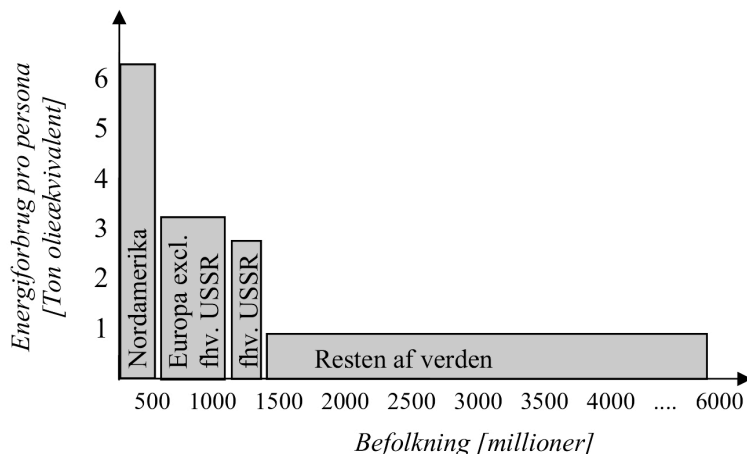
Det globale energiforbrug dækkes primært ved anvendelse af fossile brændsler som vist i Figur 3. Olie, naturgas og kul (m.a.o. fossile brændsler) dækker i alt knap 80% af energiforbruget, og vedvarende energi og atomkraft dækker hhv. 13.9 og 6.8%. Anvendelsen af fossile brændsler og atomkraft er specielt interessant, da det er begrænsede ressourcer, samtidig med at miljøproblemer ved anvendelsen af disse er specielt store. Det forekommer derfor måske også umiddelbart tilstrækkeligt kun at fokusere på anvendelsen af fossile brændsler og atomkraft, og det gøres der også ofte kun. Vedvarende energikilder er dog trods navnet også begrænsede ressourcer, og også her kan der være miljømæssige problemer forbundet med anvendelsen. Acceptable placeringsmuligheder for vindmøller begrænser således vindkraft betydeligt mere end størrelsen af selve vindressourcen.

Globale kendte reserver af fossile brændsler udgør, hvad der svarer til hhv. 41 årsforbrug af olie, 62 årsforbrug af naturgas og 230 årsforbrug af kul ved konstant 1999 forbrug og ved kendte udvindingsteknologier og uændrede økonomiske betingelser (BP-Amoco 2001). Ved stigende priser vil der naturligvis være yderligere reserver, som bliver rentable at udvinde, og samtidig vil specielt fattige landes evne til at købe energi mindskes. Begge dele vil forlænge tidshorisonten, og samtidig kan hidtil uopdagede reserver og eventuelt undervurderede reserver også have en positiv indflydelse på tidshorisonten. Alligevel må det siges, at tidshorisonten er bemærkelsesværdig lav.

Også udviklingen af det globale energiforbrug er usikker. Det afhænger af en række faktorer herunder befolkningstalsudvikling, økonomisk ud-



vikling, energieffektivitet samt tilgængelighed af energi, og mellem disse faktorer er der også indbyrdes sammenhænge.



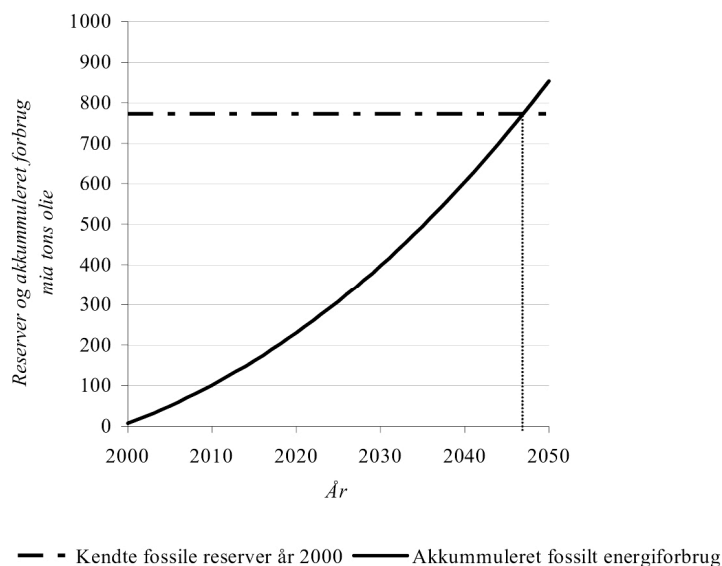
**Figur 4.** Det globale forbrug af kul, olie, naturgas, atomkraft og vandkraft. På y-aksen er vist energiforbruget pro persona i de angivne geografiske områder, på x-aksen befolkningstallet og det resulterende areal er således de enkelte områders samlede energiforbrug. Dannet ud fra data fra BP-Amoco (2001) & Verdensbanken.

Det globale energiforbrug svarer til ca. 1,4 ton olie pro persona per år, men det dækker over store variationer som vist i Figur 4. Hvor hver nordamerikaner har et energiforbrug på over seks ton olieekvivalent om året, har indbyggere uden for Europa, Nordamerika og fhv. USSR kun et forbrug på omkring en niendedel heraf, og dette indbefatter endog velstillede lande som Taiwan, Sydkorea, Japan, New Zealand og Australien. Japan og Sydkoreas energiforbrug overstiger således det samlede energiforbrug i Afrika, Syd- og Mellemamerika. Der er således en række lande med endnu lavere gennemsnitsforbrug, end hvad der fremgår af Figur 4.

Tilnærmer "Resten af verden" sig europæisk eller endog nordamerikansk niveau pro persona, vil det globale energiforbrug mere end fordobles, og de angivne reserver strække tilsvarende kortere.

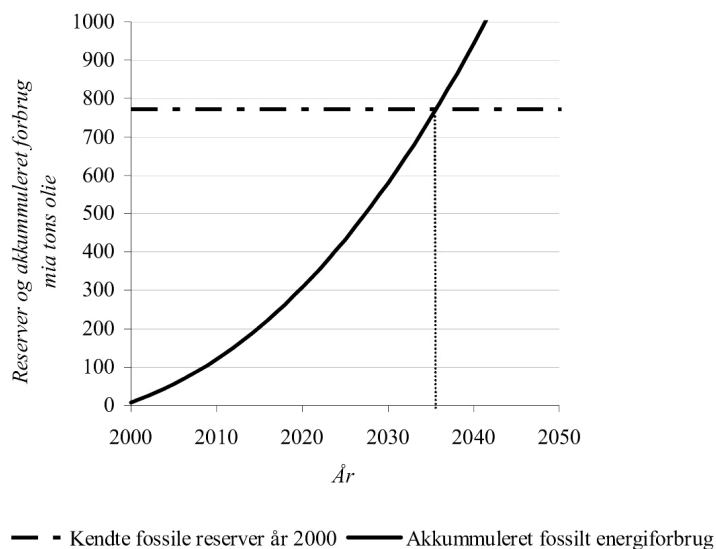
I Figur 5 er angivet de kendte fossile reserver i år 2000 samt et eksempel på en fremskrivning af det akkumulerede fossile energiforbrug efter år 2000. Det akkumulerede fossile energiforbrug efter år 2000 kan sammenholdes med de kendte fossile reserver dette år. I den anvendte fremskrivning stiger det gennemsnitlige fossile per capita energiforbrug lige så meget de

næste 50 år, som det steg fra 1950 til år 2000. Det ses, at med en sådan udvikling vil de kendte fossile reserver være udtømte om ca. 45 år.



**Figur 5.** Kendte fossile brændselsreserver år 2000 samt fremskrivning af det akkumulerede samlede fossile forbrug efter år 2000. Når de to kurver mødes, er de fossile brændselsressourcer opbrugte. Der er anvendt samme udvikling i det fossile per capita energiforbrug som i den sidste halvdel af 1900 tallet. Beregninger baseret på data fra Brown et al. (1999), US Census Bureau og BP-Amoco (2000).

Anvendes i stedet en stigningstakt, der over 50 år bringer det globale gennemsnit fra sit nuværende leje til det nordamerikanske år 2000 gennemsnit i år 2050, udtømmes de fossile energiressourcer endnu hurtigere. En sådan udvikling svarer til en firedobling af det globale gennemsnits per capita fossile energiforbrug over perioden. Det ses af Figur 6, at ved en sådan udvikling udtømmes kendte fossile reserver hastigt. Med en sådan udvikling er de fossile brændsler opbrugt i år 2036.



**Figur 6.** Kendte fossile brændselsreserver år 2000 samt fremskrivning af det akkumulerede samlede fossile forbrug efter år 2000. Når de to kurver mødes, er de fossile brændselsreserver opbrugte. I fremskrivningen når det globale per capita gennemsnit i år 2050 det nordamerikanske år 2000 per capita gennemsnit. Beregninger baseret på data fra Brown et al. (1999), US Census Bureau og BP-Amoco (2000).

Den virkelige forbrugsstigning vil nok ikke være så drastisk, men selv med en mindre drastisk forbrugsstigning udtømmes reserverne hastigt. Specielt sidste fremskrivning kan betegnes som værende ekstrem, men den anskueliggør alligevel, hvor begrænsede de fossile energiresourcer er. Jordens befolkningstal er stigende, det globale fossile energiforbrug er stigende - absolut såvel som per capita - så de fossile reserver er under pres. Ressourcebelastningen øges ved økonomisk udvikling, så energiintensiteten - dvs. forholdet mellem energiforbrug og bruttonationalprodukt - skal falde for at mindske presset. Der må komme et skift fra den historiske udvikling, hvor økonomisk fremgang har medført øget energiforbrug. Energibesparende teknologier, adfældsændringer og skift til andre energikilder må altså vinde terræn, hvis energibehov skal dækkes på længere sigt.

Miljøproblemer er også i vid ustrækning direkte proportionale med energianvendelsen, så det er også en grund til at begrænse energiforbruget. Et af de for tiden mest omtalte miljøproblemer ved energiforsyning er udledning af forbrændingsproduktet  $\text{CO}_2$ .  $\text{CO}_2$  er en drivhusgas, hvilket vil sige, at den i atmosfæren har den egenskab, at den tillader passage af kortbølget

stråling fra solen, men reflekterer langbølget genudstråling fra jorden. Øges koncentrationen af  $\text{CO}_2$  i atmosfæren, forskubbes den temperatur, ved hvilken der er strålingsbalance, og jorden opvarmes således. Der sker kontinuert en udveksling af  $\text{CO}_2$  mellem atmosfæren og biosfæren, men siden industrialiseringen har mennesket gennem anvendelse af fossile brændsler og skovrydning frigjort store mængder  $\text{CO}_2$  til atmosfæren, som ikke er blevet optaget i biosfæren igen.  $\text{CO}_2$  koncentrationen i atmosfæren er således øget med 31% siden 1750, og er nu på et niveau, der sandsynligvis er det højeste i 20 millioner år. Der er også andre drivhusgasser med stigende koncentrationer i atmosfæren, men med 60% af effekten af drivhusgasudledninger fra 1750 til 2000 er  $\text{CO}_2$  den væsentligste. Med 80% af energiforbruget dækket ved fossile brændsler kan  $\text{CO}_2$  koncentrationen i atmosfæren kun forventes at stige yderligere.

Da livet på jorden er kulstofbaseret, vil forbrænding af biomasse, hvad enten det er nyt eller fossilt, tilføre  $\text{CO}_2$  til atmosfæren. Gendannes brændslet som f.eks. ved afgrøder dyrket med henblik på udnyttelse som brændsel, optages en tilsvarende mængde  $\text{CO}_2$  under dyrkningen. Gendannes brændslet derimod ikke - som ved fossile brændsler - øges koncentrationen i atmosfæren. Det er derfor specielt vigtigt at mindske anvendelsen af fossile brændsler.

Forholdet mellem energiudbytte og  $\text{CO}_2$ -udledning varierer mellem forskellige brændsler. Naturgas har qua metanmolekylets høje brintindhold en forholdsvis lav udledning, forskellige olier har en udledningsfaktor, der er omkring 30% højere og endelig har stenkul en udledningsfaktor, der er omkring 67% højere end udledningsfaktoren for naturgas. Valget af brændsel påvirker således  $\text{CO}_2$  udledningen betydeligt.

På grund af de mulige følger af en øget drivhuseffekt, har Danmark et mål om nedsættelse af  $\text{CO}_2$ -emissionen med 20% fra 1988 til 2005 og et langsigtet sigtemål på en 50% reduktion. Disse mål er dog usædvanligt ambitiøse i global sammenhæng, og da der er tale om et globalt miljøproblem, fordres reduktioner på globalt plan.

Drivhuseffekten er ikke den eneste væsentlige miljøeffekt fra energi-anvendelse. Tidligere har der specielt været fokuseret på syrerregn. Forskellige brændsler, herunder kul og olie, indeholder svovl i varierende grader. Ved forbrænding af brændslet forbrændes svovlindholdet også, hvorved der skabes  $\text{SO}_2$ . Dette bindes til atmosfærens vandindhold, hvorved der skabes svovlsyre, som forsurer ved nedfald.  $\text{NO}_x$  (dvs. forskellige kvælstofoxider) er også medvirkende til dannelse af syreregn.  $\text{NO}_x$  skabes i forbrændingsprocesser på grund af atmosfærens ca. 80% indhold af nitrogen (kvælstof), og er således ikke en iboende egenskab ved brændslet, som det er for svovl. Det videre reaktionsmønster minder dog om reaktionsmønsteret for  $\text{SO}_2$ , idet også  $\text{NO}_x$  kan reagere med luftens vandindhold. Derved dannes salpetersyre, som igen medvirker til forsurening. Uanset hvilken type syreregn der er tale om, påvirkes fauna og f.eks. bygninger negativt.

Ved forbrænding af faste og flydende brændsler vil der også være uforbrændte restprodukter i form af sod, aske og/eller slagger i varierende mængder. Sod har en sundhedsskadelig effekt i luften. Aske og slagger er ofte alkaliske og kan have en ætsende virkning. Endelig skal nævnes atomart affald, som har en skadelig virkning på væv grundet ioniserende stråling.

Der er flere måder at kategorisere forurening fra energianvendelse. Forureningen kan grupperes efter, om forureningen skyldes valg af energikilde eller valg af forbrændingsteknologi. Svovl og CO<sub>2</sub> er således tæt forbundet til valg af energikilde, hvorimod NO<sub>x</sub> primært er knyttet til forbrændingsteknologi. Sod, aske og slagger er både knyttet til energikildevalg og forbrændingsteknologi, da dannelsen afhænger af urenheder i brændslet samt effektiviteten af forbrændingen.

Forureningen kan også grupperes efter, om den kan renses bort eller ej. SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, sod og aske kan forholdsvis effektivt renses bort - dvs. opkoncentreres og separeres - med eksisterende teknologier, og enten anvendes i anden produktion eller deponeres. Slagger er for så vidt koncentrerede allerede ved forbrændingen, men skal også deponeres. Atomart affald skal grundet helbredsrisici deponeres afsondret fra mennesker (og dyr) i titusinder af år. Tilbage er CO<sub>2</sub>, som det (endnu) ikke er umiddelbart praktisk muligt at opkoncentrere og separere efter forbrænding, og det er derfor heller ikke umiddelbart praktisk muligt at forhindre CO<sub>2</sub> fra forbrændingsprocesser i at virke som en drivhusgas i atmosfæren.

	Miljøeffekt	Niveau	Hvad påvirkes potentielt
CO <sub>2</sub>	Drivhuseffekt	Global	Alle økosystemer
SO <sub>2</sub>	Syreregn; forurening	Regional	Planter, bygninger m.v.
NO <sub>x</sub>	Syreregn; forurening	Regional	Planter, bygninger m.v.
Sod	Luftforurening; helbredsskader	Lokal	Mennesker, dyr og planter
Aske, slagger	Fast affald	Lokal	Grundvand
Radioaktivt affald	Stråleskader	Almindeligvis lokal	Mennesker og dyr

**Tabel 1.** Miljøeffekter fra energianvendelse. Skaderne for aske er opgjort under forudsætning af, at asken deponeres.

### Ændringsmuligheder

Det fremgår af Figur 2, at energisystemets forurening og ressourceanvendelse kan mindskes på tre overordnede indsatsområde. Der kan foretages omlægninger af energikilder (substitution), energikilderne kan udnyttes mere effektivt ved transformation til el og varme (teknologioptimering) eller det endelige energiforbrug kan mindskes gennem mere effektive - eller valg af andre - teknologier (renere produkter). Anvendelsen af energikrævende produkter kan endvidere ændres gennem adfærdssændringer.

### Energikilder

I det følgende beskrives forskellige ikke-fossile energikilder. De gennemgås med hensyn til potentielt arealudbytte under danske forhold, teknisk virkemåde, ulemper samt faktorer, der har indflydelse på deres anvendelse i en energisystemsammenhæng.

Solindfaldet i Danmark er på ca. 1000 kWh/m<sup>2</sup>·år. Dette kan udnyttes på flere forskellige måder - enten direkte ved anlæg, der udnytter solstråling, eller indirekte ved dyrkning af biobrændsler (se senere). Produktion af elektricitet foregår typisk i solceller, der gennem en fotoelektrisk effekt producerer elektricitet direkte. Virkningsgraden af solceller er forholdsvist begrænset. Moderne højeffektive solceller har en virkningsgrad på omkring 20%, hvilket vil sige, at arealudbyttet med sådanne solceller ligger på omkring 200 kWh/m<sup>2</sup>·år.

Solfangere producerer i modsætning til solceller varme, idet et mørkt reservoir - typisk med vand bag isolerende glaslag - opfanger solstrålingen. Det varme vand kan efterfølgende anvendes til rum- eller brugsvandsopvarmning. Årsudbyttet pr. arealenhed afhænger meget af anlæggets udformning, og der må endvidere sondres mellem udnyttelig og ikke-udnyttelig varme. Den årlige produktionskurve og forbrugskurve er mere eller mindre i modfase (dvs. minimum og maksimum på de to kurver er forskubbet et halvt år), så der produceres mest varme, når der ikke er brug for det. Et stort anlæg til et hus vil selv uden sæsonlager godt kunne dække behovet året igennem, men det vil resultere i en stor uudnyttelig produktion om sommeren. Årsudbyttet per arealenhed afhænger også af temperaturen på den ønskede varme. Jo højere temperatur, desto lavere varmeudbytte, eftersom tabene fra solfangerne stiger med temperaturen. Ved en lav temperatur, og uden at tage hensyn til om varme udnyttes eller ej, kan årsudbyttet være op imod 800 kWh/m<sup>2</sup>. I en typisk installation er den udnyttelige varmeproduktion dog snarere det halve.

For de arealværdier, der er angivet for solceller og solfangere gælder, at der er tale om udbyttet på vandrette flader. Vinkles solceller eller solfanger f.eks. 60° kan ydelsen per solfanger- eller solcelleareal øges med omkring 50% i Danmark. Den optimale vinkel afhænger naturligvis af breddegraden ved installationen. Vinklingen harmonerer ydermere fint med place-

ring på tage, hvilket også betyder, at solceller og solfangere ikke behøver at optage plads, der ellers vil kunne udnyttes til andre formål.

Solceller producerer elektricitet afhængigt af solindfaldet, og dermed afhængigt af årstid, tidspunkt på døgnet samt vejrmæssige forhold. Dette betyder, at solceller i elsystemet skal kombineres med andre produktions-teknologier (eller ellagre), hvis der skal opretholdes effektbalance. Solfangeres produktion afhænger af de samme faktorer, men da der til solfangeranlæg typisk er tilknyttet et varmelager, er det øjeblikkelige solindfald ikke så væsentligt.

Ved vindkraft omformes vindens kinetiske energi først til kinetisk rotationsenergi og dernæst til elektrisk effekt. I Danmark kan en vindmølle producere i størrelsesordenen  $1000 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{år}$  målt vinkelret på vindretningen. Omregnet til arealudbytte svarer det til i størrelsesordenen  $20\text{-}30 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{år}$  ud fra opstilling i en vindmøllepark.

Vindkraft forstyrrer ikke arealudnyttelsen meget, da jorden omkring vindmøller f.eks. stadig vil kunne dyrkes. Landskabelige aspekter kan dog tale imod vindkraft.

Vindens effekt afhænger af vindhastigheden i tredje potens, hvilket bevirker, at selv en lille variation i vindhastighed har en stor indvirkning. Ved anvendelse af vindkraft stilles derfor store krav til resten af energisystemet og dets evne til at afbalancere elforbrug og elproduktion. Årstmæssigt er variationen af vindkraft favorabel, da vindhastighed og luftens massefylde er størst om vinteren, hvorved den gennemsnitlige effekt også er størst. Dette passer sammen med elforbruget, som også er højest om vinteren, men denne overensstemmelse er ikke tilstrækkelig til korttidsregulering.

Ved vandkraft udnyttes vandcyklussen, hvor havvand fordampes af solen, og falder som regn på land, og der er således tale om en form for indirekte solenergi. Ved at udnytte vandets fald mellem områder med højdeforskelle, kan vandets energi omsat til kinetisk energi i en turbine og dernæst til elektricitet.

Fælles for de fleste vandkraftanlæg i verden er, at de fordrer en opdæmning af vand for at skabe kunstige reservoirer. Disse kan have alvorlige landskabelige og økologiske gener til følge. Danmark er velsignet med rigelige regnvandsressourcer, men da højdeforskellene i Danmark desværre er begrænsede, er vandkrafts potentiale i Danmark også begrænset. Der er dog en række mindre anlæg, og vandkraft har tidligere udgjort en betydelig andel af den samlede elproduktion i f.eks. Jylland.

Vandkraft har den fordel fremfor vindkraft, solceller og solfangere, at energiressourcen kan lagres, hvorved der kan genereres elektricitet efter behov. Der forudsættes således ikke andre anlægstyper for effektbalanceregulering.

Dyrkning af biobrændsler er atter en indirekte udnyttelse af solenergi, og biobrændsler kan som andre brændsler anvendes til både el og varmepro-

duktion enten i individuelle villafyr eller i kraft- eller kraftvarmeværker. En underkategori er olieholdige planter såsom raps, hvorfra der kan udvindes olie, som kan anvendes i dieselmotorer.

Arealudbyttet for biobrændsler er i Danmark op til 4-5 kWh/m<sup>2</sup>·år, men heri er ikke indregnet energiforbrug til dyrkning. Derudover skal det bemærkes, at dyrkning af biobrændsler vil skulle optage landbrugsjord, hvilket begrænser potentialet. Der er ydermere en række tekniske ulemper ved biobrændsler. Forbrændingsprodukterne er alkaliske og klorholdige, og virker derfor tærende på metal. Dette er specielt et problem ved højere temperaturer, da den kemiske reaktivitet stiger med temperaturen. Da en høj temperatur samtidig er forudsætning for effektiv elproduktion (se senere), giver det problemer ved specielt elproduktion. Rensning af røggasser, udvikling af korrosionsbestandige materialer eller andre former for udnyttelse af biobrændsler end direkte forbrænding er derfor væsentlig.

Biobrændsler kan lagres og anvendes efter behov, og biobrændselsfyrede anlæg kan således fungere som backup for energianlæg baserede på fluktuerende energikilder som f.eks. vindkraft og sol.

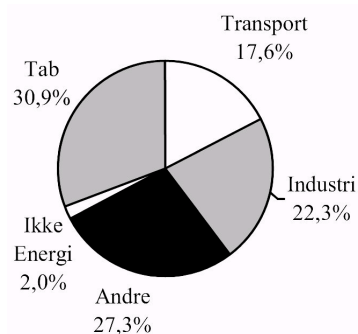
Biogas produceres ved anaerob nedbrydning af organisk materiale såsom materiale dyrket til formålet, gylle eller anden form for organisk affaldsprodukter, herunder husholdningsaffald. Resultatet af processen er biogas, som hovedsageligt består af metan, samt afgasset organisk materiale. Biogassen kan efter rensning for uønskede stoffer anvendes i de samme typer anlæg som naturgas, dvs. gasmotorer, gasturbiner, gaskedler mv.

Udover at være en måde til energiproduktion er biogasfremstilling også en måde til affaldshåndtering. Mængden reduceres, lugtgener fra materialet reduceres og der muliggøres en hygiejniseret genanvendelse som markgødning.

### ***Energitransformation***

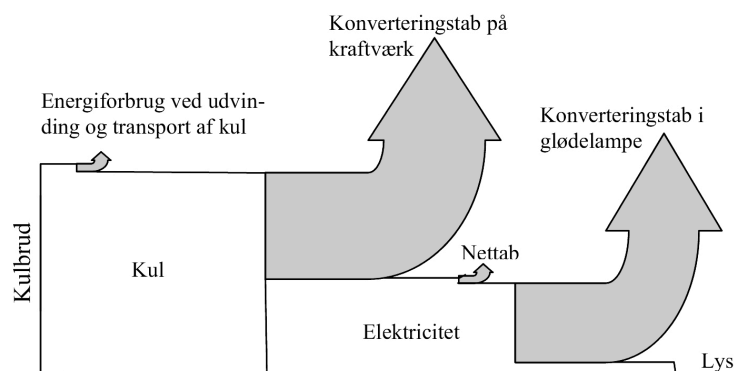
Betragtes anvendelsen af energi, ses, at det største forbrug er tab. Råolie anvendes ikke i form af råolie, men raffineres til en række olieprodukter som benzin og diesel, og tilsvarende anvendes kul oftest efter omdannelse til el eller varme. Der er således en række tab og energiforbrug, før energiresourcen overhovedet kommer i den form, den ønskes anvendt. Denne proces kaldes transformation, og tabene og forbrugene herved udgør knap 31% af det samlede globale energiforbrug som vist i Figur 7.





**Figur 7.** Fordeling af det primære energiforbrug i verden på anvendelser 1998. Kilde: IEA.

De tab, der er angivet i Figur 7, er alene de direkte tab og forbrug ved konvertering af f.eks. kul til elektricitet. Det energiforbrug der er anvendt til udvinding af kul, og de tab der er ved omdannelse af elektricitet til den ønskede vare - det være sig f.eks. mekanisk kraft, lys, varm mad, audio eller video - er ikke omfattet heraf. Der er således yderligere betydelige tab i kæden fra udvinding af energiressource til fremskaffelse af den ønskede energiydelse.



**Figur 8.** Typiske tab og egetforbrug i energikæden fra energiressource (kul i jorden) til ønsket energitjeneste (lys). Forbruget til udvinding er det faktuelle forbrug i Danmark; tabet i kraftværket er på et højeffektivt værk; nettab er de faktuelle, og endelig er der anvendt en ineffektiv men almindelig glødelampe.

I Figur 8 ses f.eks., at der er et betydeligt tab ved transformation fra kul til el, og igen ved transformation fra el til lys. I forhold til den energi-

mængde, der blev udgravet i form af kul, er under tre procent tilbage ved levering af den ønskede ydelse - belysning.

Ved enhver transformation af brændsel til mekanisk effekt i en termodynamisk maskine (stempelmotor, gasturbine, dampturbine) er der en begrænsning på transformationens effektivitet, som er fastlagt ved den såkaldte Carnot-faktor. Det betyder kort sagt, at det er meget energikrævende at producere mekanisk kraft eller elektricitet på baggrund af varme. Det er derfor også specielt vigtigt at spare eller substituere elektricitet.

Den energi, der ikke nyttiggøres i en stempelmotor, gas- eller dampturbine som mekanisk kraft, forbliver som varme. Fordelingen mellem varme og elproduktion på et kraftværk vil typisk være ligelig, med en tendens til en gradvis stigende varmeandel med mindre værksstørrelser. Varmen kan nyttiggøres til opvarmning, hvis der er et sådan behov. I Danmark udnyttes varmen ofte til fjernvarme, hvorimod dette ikke er tilfældet ret mange steder i udlandet på trods af det betydelige potentiale, der kan ses af Figur 7 og 8.

#### Boks 1: Carnotfaktoren

Carnotfaktoren er fastlagt ved  $1 - T_l/T_h$ , hvor  $T_h$  er dampens eller forbrændingsgassernes (høje) temperatur og  $T_l$  er den (lave) omgivelsestemperatur som damp eller forbrændingsgasser maksimalt kan køles ned til i processen.

Af udtrykket ses, at jo højere  $T_h$  er og jo lavere  $T_l$  er, desto højere er virkningsgraden. I en hvilken som helst motor eller turbine i et kraftværk eller i en bil gælder det derfor om at opnå så høj temperatur som mulig. Derfor har et islandsk geotermisk kraftværk baseret på damp ved 250°C således en lavere virkningsgrad end et dansk kulfyret kraftværk med en damp-temperatur på f.eks. 582°C.

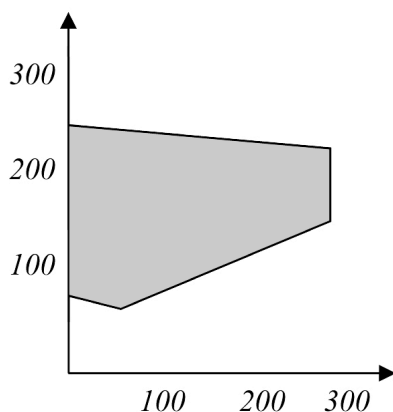
Materialeegenskaber og herunder temperaturbestandighed er blandt de faktorer, der begrænser temperaturen og dermed virkningsgraden. Da kemisk reaktionsevne øges med temperaturen, er der endvidere et afvejningsspørgsmål specielt i forbindelse med brændsler indeholdende korrosive elementer som f.eks. halm.

Der eksisterer en række forskellige dampkraftværkstyper, som alle kan tilpasses forskellige brændselsvalg som kul, olie, biomasse eller gas. Fælles for disse samt gasturbiner er, at et medium - damp eller røggasser - ekspanderes gennem en eller flere turbiner, hvorved denne eller disse drives rundt. Turbinerne driver efterfølgende en generator, der producerer elektricitet.

*Kondensværker* er den mest effektive dampbaserede kraftværkstype til produktion af el. At det er et kondensværk betyder, at dampen kondenseres i

forbindelse med turbinen, hvorved der opnås så lavt tryk efter turbinen som muligt, hvorved dampen anvender det fulde potentielle trykfald til omdannelse til mekanisk kraft. I kondensværker leveres varmen ved en så lav temperatur, at det ikke er praktisk muligt at anvende den til opvarmning. Topmoderne dampbaserede kraftværker har virkningsgrader op imod 50% i kondensdrift, og marginal elproduktion er ofte produceret i kondensdrift.

I *modtryksværker* er trykket efter turbinen tilstrækkeligt højt til at dampen ikke kondenseres. Den kondenseres i stedet i en varmeveksler, hvor fjernvarmevand så opvarmes. Der leveres således varme ved en temperatur, der er tilpas høj til opvarmningsformål. Forholdet mellem el- og varmeproduktion ligger fast, og kan altså ikke varieres. Medregnes både varme og el, kan der opnås en såkaldt totalvirkningsgrad på omkring 90%.



**Figur 9.** Eksempel på udtagsværks arbejdsområde.

I modsætning til i modtryksværker kan forholdet mellem varme og elproduktion varieres forholdsvis frit i udtagsværker. Dette gøres ved, at der kan tages damp ud forskellige steder i systemet med henblik på varmeproduktion. Der er altså en bedre mulighed for at tilpasse varme- og elbalancer i energisystemer ved udtagsværker. Et udtagsværk kan også køre i kondensdrift, hvorved det opnår den høje elvirkningsgrad. Totalvirkningsgraden kan være omkring 90%.

Mindre værker vil typisk laves med gasturbiner eller stempelmotorer, som begge fordrer en form for olie eller gas. Begge kan for så vidt laves ned til størrelser, der kan passe til et modelfly, men der er på bekostning af virkningsgraden. Typisk vil gasturbineanlæg ikke laves mindre end 1 MW, hvorimod stempelmotorer - som principielt ikke er forskellige fra bilmotorer - kan anvendes i endnu mindre værker. Sådanne anlæg kan have elvirknings-

grader mellem 40 og 50%, og medregnes varmeproduktionen, opnås en totalvirkningsgrad på op imod 90%.

I en gasturbine - som ikke afviger meget fra en fly-jetmotor - leveres udstødningsgasser ved en temperatur på 4-600°C. Disse udstødningsgasser kan udnyttes til opvarmningsformål eller elproduktion ved brug af en såkaldt afgaskedel. Anvendes afgaskedlen til dampproduktion, som dernæst anvendes i en dampturbine, kaldes anlægget et Combined Cycle-anlæg. Anvendes afgaskedlen kun til varmeproduktion betegnes anlægget et Simple Cycle-anlæg. Et Combined Cycle-anlæg har derfor en højere elvirkningsgrad end Simple Cycle-anlægget, og elvirkningsgraden kan nærme sig 60%. Totalvirkningsgraden for el og varme er op imod 90%.

Varmepumper er en effektiv måde at fremstille varme fra el på. Hvor el- og oliekedler kan have en virkningsgrad, der nærmer sig 100%, kan varmepumper levere mere varme, end der tilføres som elektrisk effekt, idet varmen tages fra et reservoir som f.eks. jorden. Typisk vil en varmepumpe levere mindst 2.5 gange mere varme, end den optager i form af elektricitet. Det nøjagtige forhold afhænger af temperaturforholdene.

Alle førnævnte teknologier er underlagt carnotfaktoren (Boks 1), dvs., der er en øvre grænse for virkningsgraden, som er bestemt af temperaturforholdene i processen. Brændselsceller er ikke baserede på en termodynamisk proces men derimod en elektrokemisk proces, så de er ikke underlagt carnotfaktorens begrænsning. Brændselsceller finder dog stadig kun anvendelse under forsøgslignende forhold eller i meget specielle sammenhænge såsom rumfart. Der er dog fremtidsperspektiver at finde her.

Anlægstype	Karakteristika	Virkningsgrad
Kondensværk	Producerer el	Op til ca. 50% elvirkningsgrad
Modtryksværk	Producerer el og varme	Total (el + varme) op til ca. 90%
Udtagværk	Producerer el og varme	Total (el + varme) op til ca. 90%
Stempelmotorer	Producerer el og varme	Total (el + varme) op til ca. 90%
Gasturbiner	Producerer el og varme	Total (el + varme) op til ca. 90%
Varmepumper	Producerer varme	Ca. 250%-400% målt i forhold til elforbrug

**Tabel 2.** Typer af el- og varmeproducerende anlæg.

I effektive energisystemer anvendes varme fra elproduktion til opvarmningsformål, og forskellige vedvarende energiteknologier som solfångere, solceller og vindmøller producerer afhængig af de meteorologiske forhold. Med el- og varmebehov, der ikke nødvendigvis er i fase, samt vindkraft og solceller, der hurtigt, til dels ukontrollabelt men dog delvist forudsebart kan ændre produktionen, er der et problem.

Generelt er der i energisystemer en række bindinger i form af krav til stabilitet af produktion samt balanceregulering. I varmesystemet og naturgassystemet er kravene forholdsvis begrænsede, hvorimod kravene til elsystemet er forholdsvis strenge. Begrænsede ændringer i fremløbstemperatur i individuelle eller kollektive varmforsyningsanlæg er ikke kritiske, og der er samtidig en bufferkapacitet i systemerne. Det samme er gældende for naturgassystemer, hvor visse anlægstyper dog fordrer et vist minimumstryk. Ud over den bufferkapacitet, der er i selve varme- og naturgasledningerne, er der også lagre indbygget i systemerne, som kan anvendes til balanceregulering af forbrug og produktion. Mere kritisk er situationen, hvad angår elsystemet. Ved ubalancer mellem produktion og forbrug ændres frekvens og/eller spænding, hvilket ikke er ønskeligt. Det kan have en indvirkning på forskellige elektriske apparater, og endvidere er Danmark internationalt forpligtet til at opretholde frekvensstabilitet.

I Danmark stammer omkring 10% af elproduktionen fra vindkraft (2000), og over 50% af elproduktionen produceres sammen med udnyttet varme. Tilbage er 40%, som produceres på termiske kraftværker uden anvendelse af varmen. Denne andel - som er en indikation af størrelsen af energisystemets uproblematisk manøvreområde - vil falde ved yderligere udbygning af vindkraft og solceller samt ved en videre anvendelse af varme fra elproduktion.

Hvor et stort kulkraftværk tager i størrelsesordenen otte timer at starte op fra kold tilstand eller 15 minutter fra standby til fuld last, måles små kraftværkers start- og responstider snarere i minutter og sekunder. I det skift, der er undervejs fra elproduktion på få store værker til elproduktion på tusindevis af små værker, er der således også indbygget muligheder for en dertil hørende decentral balanceregulering. Da det samtidig vil være uøkonomisk at have anlæg stående stand-by alene med henblik på situationer f.eks. uden vind, må den voksende balancereguleringsopgave løses med en kombination af regulering af el- og varmeffekter på alle værker i systemet, anvendelse af varmelagre, der kan forskyde elproduktion og dækkelse af varmebehov, varmepumper, kontrollerbare elforbrugende anlæg, import, eksport, eventuel fremstilling af brint og anvendelse af ellagre.

Import og eksport kan anvendes til balanceregulering gennem anvendelse af internationale transmissionsledninger, men med de effekter, der kan blive tale om, hvis der ikke forsøges lokal balanceregulering, vil det fordrer et kraftigere transmissionsnet samt velvillige naboer; to ting det kan være svært at skaffe. Lokal balanceregulering er således påkrævet.

### Slutforbrug

Det eneste direkte energiforbrug mennesket har brug for at få stillet, dækkes ved hjælp af mad. De energiforbrug mennesket ellers har er for at få forskellige ydelser som et komfortabelt indeklima, lys, afkøling og tilberedning af fødevarer, transport, lyd, billeder og varefremstilling. I ingen af disse kategorier er energiforbrug et direkte ønske eller krav. Man taler om at energien leverer en tjeneste - en energitjeneste. Selve tjenesten kan leveres på mange forskellige måder. Lysintensiteten på et skrivebord vil f.eks. afhænge af bygningskonstruktionen (mængde og placering af vinduer), rumindretning (placering af møbler og farvevalg) og kunstig belysning. Lysbehovet afhænger også af organiseringen af arbejdet herunder f.eks. arbejdstidspunkt, men det er snarere energitjenestens metaniveau. Endelig dækkes med belysning ofte et ikke-eksisterende behov, ved at der ikke altid er mennesker i oplyste rum; det er således også et adfærdsspørgsmål. Adfærd er i det hele taget et væsentligt punkt med indflydelse på alt fra tøjvaskefrekvens til valg af transportmiddel mellem hjem og arbejde. Det er således væsentligt at gøre sig kompleksiteten af de faktorer, der påvirker et givet forbrug bevidst. At ækvivalere energibesparelser til belysning med erstatning af glødetrådspærer med energisparepærer eller erstatning af lysstofrør med højfrekvente lysstofrør begrænser således fra starten potentialet for besparelser.

Det endelige energiforbrug kan overordnet opdeles i en række kategorier med en række fælles tekniske karakteristika: elmotorer, rumopvarmning, proces, transport, belysning og diverse. Disse karakteristika bestemmer, hvilke tekniske muligheder der er for reduktion af energiforbruget.

Elmotorer udgør den største andel af elforbruget i Danmark med en andel på anslået 50%. Elmotorer omfatter alt fra cirkulationspumper i parcelhuse, pumper i industrien, kompressorer i køleanlæg til elværktøj. Elmotorer kan være ganske effektive, hvis de er dimensionerede korrekt, og hvis de anvendes med konstant belastning. Hvis disse forudsætninger er opfyldte, kan virkningsgraden være 90%, men da det ofte ikke er tilfældet, er den snarere under 50%. Elmotorer er oftest overdimensionerede, og belastes således langt under, hvad de er designet til. Korrekt dimensionering samt en nogenlunde fast belastning vil således mindske elforbruget betragteligt. Dette er selvfølgelig ikke muligt i alle tilfælde, men hvad angår motorer i industrien, cirkulationspumper og andre med fast belastning, er der besparelsemuligheder.

Rumopvarmning udgør qua Danmarks klima en stor andel af det samlede energiforbrug. Før oliekriserne i 1970'erne var der ikke speciel megen fokus på isolering af bygninger. Bygningerne skulle leve op til bygningsreglementet, men set med dagens øjne, var kravene ikke stramme. Siden da er kravene dog langsomt steget.

	1950	1980	2000	2020
Loft [mm]	50	200	250	450
Ydervæg [mm]	0	125	150	350
Gulv [mm]	30	75	125	200
Varmebehov GJ/m <sup>2</sup>	0,75	0,40	0,25	0,07

**Tabel 3.** Isolering og varmekonsum i fire tidstypiske huse. Kilde: *Energistyrelsen (1995)*.

I Tabel 3 ses eksempler på fire tidstypiske huse, hvoraf det sidste alene er medtaget for at vise potentialet. Et hus bygget efter oliekriserne kan have et varmekonsum, der er halvt så stort som et tilsvarende hus bygget før, og i projektionen for år 2020, kan det ses, at energikonsumet til rumopvarmning kan reduceres med en faktor 10. Energikonsumet kan faktisk bringes ned på nul med en passende isolering, så det er alene en økonomisk afvejning, der begrænser isoleringsstandarden.

Procesenergi er industriens energikonsum - oftest som varme - til de forskellige processer, der foregår. Det være sig f.eks. stålsmelting, cementfremstilling og rengøring i fødevarerindustrien. Cement- og stålproduktion er to meget energiintensive aktiviteter, som der i forvejen er stor fokus på. De vil derfor ikke blive behandlet her. Derudover er der et stort forbrug af procesdamp i industrien - dvs. damp ved en temperatur på 100-250°C, som anvendes til rengøring, opvarmning og inddampning i fødevarerindustri og kemisk industri. Ofte laves damp på kedler som enten er elektriske eller fyrede med gas. Grundet de tab der er ved elproduktion, er det generelt ikke energimæssigt fornuftigt at anvende el til varmfremstilling; varmfremstilling ved naturgas er direkte og derved energibesparende. Ved tilpas høje varmekonsum er det rimeligt at installere kraftvarmeanlæg, hvor der produceres elektricitet, som dermed ikke behøver at blive produceret i kondensdrift.

Energikonsumet til transport er ganske betydeligt - og besparelspotentialet derfor også. Der er tekniske muligheder for ressourcebesparelser indenfor transportområdet. Fremfor benzin- eller dieselmotorer kan der indføres eldrevne motorer, som enten forsynes fra batterier eller fra brintdrevne brændselsceller. Batterierne kan oplades og brinten kan produceres via vedvarende energikilder. En væsentlig determinant for energikonsumet til transport er dog adfærd samt det strukturelle energikonsum, der skabes af samfundets indretning. Det behandles i næste kapitel.

Energikonsumet til belysning kan sænkes på flere forskellige måder som kort beskrevet før. I en glødelampe bliver kun omkring 6% af energien omformet til synligt lys - resten bliver til varme. I et lysstofrør er virknings-

graden omkring 20% og anvendes højfrekvente lysstofrør, kan virkningsgraden øges til op imod 25%. Sidstnævnte er dog primært relevant i virksomheder med et betragteligt belysningsbehov. I private hjem er såkaldte energisparepærer oftest mere relevante; de er blot forklædte lysstofrør.

Den sidste kategori omfatter primært elektronik, og apparater som radio, tv, video og ikke mindst computere udgør en kraftigt voksende andel af elforbruget. Dette skyldes dels en voksende anvendelse, men også dels at anlæggene vokser i størrelse. Voksende TV- og computerskærme medfører voksende forbrug, men en af de væsentligste stigninger er nok standby forbrug. I Danmark er det årlige forbrug til standby op mod 1 TWh ud af et samlet elforbrug på knap 33 TWh og i husholdninger er det omkring 10% af det samlede elforbrug. På globalt plan hidrører 1% den samlede CO<sub>2</sub>-udledning fra elproduktion, transport, affaldsforbrænding m.v. fra produktion af standbyelektricitet. (Kilde: Energipilen) Gennem valg af apparater med lave standbyforbrug, indførsel af produktkrav (standarder) eller gennem adfærdsændringer, kan dette forbrug sænkes betragteligt.

### ***Afkobling og radikalitetsstigen***

Som beskrevet findes der en række tekniske muligheder for at minimere anvendelsen af energiressourcer og for at minimere miljøbelastningen fra anvendelsen af disse, men hvis ressourceanvendelsen og miljøbelastningen skal sænkes markant, fordres ikke kun tekniske ændringer. En fremtidssikret energiforsyning fordrer en afkobling mellem på den ene side energiressourceforbrug og miljøbelastning og på den anden side økonomisk og befolkningsmæssig udvikling, og der fordres mere gennemgribende ændringer for at opnå dette. Et skift til vedvarende energikilder er et skridt på vejen, men også disse er begrænsede ressourcer, og også her er der miljømæssige problemer ved anvendelsen. Der fordres således andre og flere ændringer, der kan mindske den overordnede energianvendelse.

Renere teknologtrin på den såkaldte substitutionsstige - eller radikalitetsstige - som i den ene ende har den mest belastende laissez-faire miljøtilgang og i den anden ende har miljøbelastningsminimering indtænkt i alle humane ford. Ved enfkobling skal flere trin på stigen tages i anvendelse end blot renere teknologi. Det største potentiale ligger i adfærdsændringer, hvad enten disse adfærdsændringer induceres gennem teknologivalg eller indretningen af selve samfundsopbygningen. Sådanne adfærdsændringer nås ikke med renere teknologi.



Substitutionstrin
Udledning
Deponering
Rensning
Renere teknologi
Renere produkter
Renere systemer
Renere livsformer

**Tabel 4.** Substitutionsstigen.

Gennemgribende ændringer fordrer deltagelse af aktører ud over den almindelige energisektor. For det første er der en vis teknologikonservatisme qua tradition og foretagne investeringer i energisektoren - for det andet vil der skulle ske så store ændringer og på så forskellige niveauer, at energiselskaberne intet specielt fortrin har. Det være sig den overordnede samfundsmæssige struktur samt de valg, hver enkelt indbygger foretager. Energisektor, andre økonomiske sektorer, det politiske niveau og indbyggere vil således skulle inddrages i omlægningen.

### Referenceliste

- BP-Amoco: *Statistical review of world energy June 2000*, London: BP-Amoco 2000.
- Brundtlandkommissionen: *Vores Fælles Fremtid*, København: FN-forbundet og Mellemfolkeligt Samvirke 1987.
- Brown, Lester R., Gary Gardner, Brian Halweil.: *Beyond Malthus: Nineteen Dimensions of the Population Challenge*, New York: W.W. Norton 1999.
- Energipilen: [www.energipilen.dk](http://www.energipilen.dk) (Elsparefonden, Energistyrelsen & Dit Elselskab).
- Energistyrelsen: *Danmarks Energifremtider*, København: Energistyrelsen december 1995.
- Energistyrelsen: *Energistatistik 2000*, København: Energistyrelsen 2001.
- IEA: International Energy Agency, på [www.iea.org](http://www.iea.org)
- Meyer, Niels I., Jørgen Stig Nørgård, Georg Galster & Tom Guldbrandsen: *Energi og ressourcer - for en bæredygtig udvikling*, København: Polyteknisk Forlag 1994.
- US Census Bureau: <http://www.census.gov/ipc/www/world.html>.
- Verdensbanken: [www.worldbank.org](http://www.worldbank.org).